

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

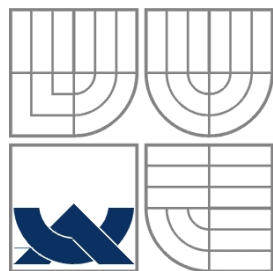
VIZUALIZACE A ANIMACE POHYBU NABITÝCH ČÁSTIC V ELEKTRICKÝCH POLÍCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

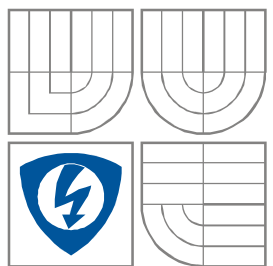
Jan Kachlík

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologií**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANIMACE POHYBU NABYTÝCH ČÁSTIC V ELEKTRICKÝCH POLÍCH

VISUALISATION AND ANIMATION OF CHARGE CARRIERS IN ELECTRICAL FIELDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kachlík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Kachlík Jan

Ročník: 3

ID: 78163

Akademický rok: 2008/09

NÁZEV TÉMATU:

Animace pohybu nabitých částic v elektrických polích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teoreticky zdůvodněte pohyb nabitých částic v elektrických polích.
2. Animujte chování spínacího oblouku ve zhášedle vypínače vn.
3. Animujte vznik nanovláken v Nanospideru®.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 29.05.2009

Vedoucí projektu: doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jan Kachlík

Bytem: Komořany 229, Rousínov, 68301

Narozen/a (datum a místo): 24.06.1986 ve Vyškově

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá

elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

☐ disertační práce

☐ diplomová práce

☒ bakalářská práce

☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Animace pohybu nabitých částic v elektrických polích

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

Ústav: Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP: 15.6.2009

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v *:

☒ tištěné formě – počet exemplářů 1

☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu se zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou elektromagnetismu. Cílem je seznámení se s fyzikálními zákonitostmi elektrického a magnetického pole. Zejména silového působení na nabitě částice pohybující se v těchto polích.

Ve druhé části této práce je stručně popsáno chování spínacího oblouku ve zhášedle vypínače vn. Princip funkce je animován pomocí programu Autodesk 3ds Max 2009.

Posledním bodem zadání bakalářské práce je vytvoření animované prezentace výroby nanovláken pomocí unikátní technologie Nanospider®

Abstract

This bachelor`s thesis deal with electromagnetic field. The aim of this thesis is acquaintance with physical regularity electric and magnetic field. Especially force effect to charge carriers traveling in these fields.

In second part of this project is briefly describe switching arc behavior in high voltage circuit breaker. Principle function is animated in Autodesk 3ds Max 2009.

Final point of assignment is create animated presentation about production nanofibres with help of unique technology Nanospider®

Klíčová slova

Animace; modelování; elektrický oblouk; elektromagnetické pole; Autodesk 3ds Max; Nanospider; nanovlákná.

Keywords

Animation; modeling; electric arc; electromagnetic field; Autodesk 3ds Max; Nanospider; nanofibre.

Bibliografická citace

KACHLÍK, J. *Animace pohybu nabitých částic v elektrických polích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Animace pohybu nabitých částic v elektrických polích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

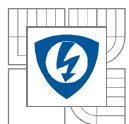
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohuslavu Bušovovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

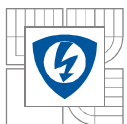
V Brně dne

Podpis autora

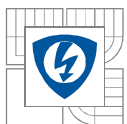


OBSAH

1 ÚVOD	14
2 ELEKTROSTATIKA	14
2.1 DŮLEŽITÉ VELIČINY ELEKTROSTATIKY.....	14
2.2 ELEMENTÁRNÍ NÁBOJ	15
2.3 ELEKTRICKÉ POLE.....	15
2.3.1 ELEKTRICKÉ SILOČÁRY.....	16
2.4 ELEKTROSTATICKÉ JEVY	17
2.4.1 PŘITAHOVÁNÍ A ODPUZOVÁNÍ NABITÝCH TĚLES	17
2.4.2 ELEKTROSTATICKÁ INDUKCE	17
2.4.3 POLARIZACE DIELEKTRIKA	18
2.4.4 ELEKTRIZACE TĚLES – STATICKÁ ELEKTRINA	18
2.5 COULOMBŮV ZÁKON.....	19
2.6 GAUSSOVA VĚTA	20
3 ELEKTROMAGNETISMUS.....	21
3.1 MAXWELLOVY ROVNICE	22
3.1.1 PRVNÍ MAXWELLOVA ROVNICE – ZÁKON CELKOVÉHO PROUDU	23
3.1.2 DRUHÁ MAXWELLOVA ROVNICE – FARADAYŮV INDUKČNÍ ZÁKON	23
3.1.3 TŘETÍ MAXWELLOVA ROVNICE – GAUSSŮV ZÁKON ELEKTROSTATIKY.....	24
3.1.4 ČTVRTÁ MAXWELLOVA ROVNICE – ZÁKON SPOJITOSTI INDUKČNÍHO TOKU	24
3.2 MAGNETICKÉ POLE	24
3.2.1 MAGNETICKÉ INDUKČNÍ ČÁRY	25
3.2.2 MAGNETICKÉ POLE PŘÍMÉHO VODIČE	25
3.2.3 POLE PROUDOVÉHO ZÁVITU A VÁLCOVÉ CÍVKY.....	25
3.2.4 MAGNETICKÁ INDUKCE	25
3.2.5 AMPÉRŮV ZÁKON	26
3.3 POHYB NABITÉ ČÁSTICE V HOMOGENNÍM MAGNETICKÉM POLI.....	27
4 ELEKTRICKÝ PROUD V PLYNECH	29
4.1.1 ELEKTRICKÝ VÝBOJ	29
4.1.2 ELEKTRICKÝ OBLOUK	30
4.1.3 ELEKTRICKÝ VÝBOJ ZA NÍZKÉHO TLAKU.....	30
5 ROTAČNÍ CÍVKA VE ZHÁŠEDLE VYPÍNAČE VN.....	30
5.1 ÚČINKY AXIÁLNÍHO MAGNETICKÉHO POLE NA OBLOUK	31
6 NANOSPIDER	33
6.1 HISTORIE VÝROBY NANOVLÁKEN	33
6.2 PRINCIP TECHNOLOGIE NANOSPIDER	34
6.3 VYUŽITÍ NANOVLÁKEN	34
6.4 ELEKTROSPINNING	35
6.4.1 VÝROBNÍ PROCES.....	35

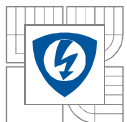


7 TVORBA ANIMOVANÉ PREZENTACE	36
7.1 PRACOVNÍ POSTUP PŘI TVORBĚ ANIMACE SPÍNACÍHO OBLOUKU.....	37
8 ZÁVĚR.....	39
9 POUŽITÁ LITERATURA	40
PŘÍLOHY	41



SEZNAM OBRÁZKŮ

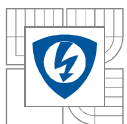
<i>Obrázek 2.1 Kladný testovací náboj Q v blízkosti nabitého tělesa</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2.2 siločáry pole dvou nábojů opačných znamének.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2.3 rovnoměrně rozložené kladné a záporné náboje</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2.4 rozložení el. náboje pod vlivem vnějšího náboje</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 2.5 vzájemné působení nabitých částic</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3.1 Vektory el. intenzity a mag. indukce jsou vůči sobě kolmé</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 3.2 trajektorie nabité částice v homogenním magnetickém poli.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 5.1 magnetické pole zhášecí cívky</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 5.2 složky magnetické indukce</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 5.3- souhlasné vektory el. Intenzity a mag. indukce</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 5.4- řez elektrickým obloukem</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 6.1- Vizualizace Nanospider zdroj: www.elmarco.com.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 6.2- Fotografie Taylorova kuželu</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 6.3- Princip elektrospinningu</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 6.4- Electrospray</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 6.5- Proces tuhnutí vlákna</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 7.1 - 3D model cívky</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 7.2 - vyrenderovaný snímek spínacího oblouku.....</i>	<i>38</i>



SEZNAM TABULEK

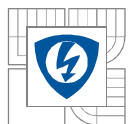
Tabulka 1- Důležité veličiny elektrostatiky 14

Tabulka 2 - Důležité veličiny elektromagnetismu 23



SEZNAM ZNAČEK HLAVNÍCH VELIČIN

Značka:	Název:	Jednotka:
Q	Elektrický náboj	C
E	Intenzita elektrického pole	V/m
U	Elektrické napětí	V
C	Elektrická kapacita	F
P	Elektrická polarizace	C/m ²
D	Elektrická indukce	C/m ²
H	intenzita magnetického pole	A/m
B	magnetická indukce	T
ρ	hustota volného náboje	C/m ³
j	hustota elektrického proudu	A/m ²



1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou elektromagnetismu. Cílem je seznámení se s fyzikálními zákonitostmi elektrického a magnetického pole. Zejména silového působení na nabitě částice pohybující se v těchto polích.

Dalším bodem práce je vytvoření animované prezentace funkce rotační cívky ve zhášedle vypínače vn. Pro tvorbu animace je použit grafický software Autodesk 3ds Max 2009. Jedná se o komplexní softwarový balík obsahující funkce pro návrh geometrických modelů, materiálů, osvětlení scény a tvorbu animace.

Poslední částí bakalářské práce je vytvoření animované prezentace vzniku nanovláken pomocí unikátní technologie Nanospider®. Jedná se o český vynález profesora Oldřicha Jirsáka z Technické univerzity v Liberci. Tato technologie umožňuje průmyslovou výrobu nanovláknenných textilií na principu elektrostatické síly. Animace je opět vytvořena v programu Autodesk 3ds Max 2009.

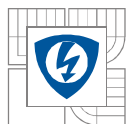
2 ELEKTROSTATIKA

Elektrostatika je část fyziky, která studuje elektrické jevy, které souvisejí s (časově) ustáleným (neměnným) vzájemným silovým působením elektricky nabitých částic a těles. V širším slova smyslu se do elektrostatiky řadí i jevy elektrizace těles a (i nestatické) projevy tzv. statické elektřiny. Základním pojmem elektrostatiky je statické elektrické pole, které lze popsat pomocí vektorového pole intenzity elektrického pole nebo pomocí skalárního potenciálu. Základním zákonem elektrostatiky je Coulombův zákon, ze kterého lze odvodit další zákony a věty elektrostatiky. Jevy souvisejícími s proměnným elektrickým polem (jakož i elektromagneticky indukovaným statickým elektrickým polem) se zabývá elektrodynamika. [6]

2.1 Důležité veličiny elektrostatiky

Označení	Význam	Jednotka SI
Q	Elektrický náboj	C
E	Intenzita elektrického pole	V/m
U	Elektrické napětí	V
C	Elektrická kapacita	F
P	Elektrická polarizace	C/m ²
D	Elektrická indukce	C/m ²

Tabulka 1- Důležité veličiny elektrostatiky



- **Elektrický náboj Q** - vyjadřuje určitou vlastnost částic, která je spojována se vznikem vzájemného působení mezi tělesy (částicemi) podobným způsobem jako je hmotnost spojována s existencí gravitačního pole. Přítomnost elektrického náboje je tedy nutná pro vznik elektrického nebo magnetického pole.
- **Intenzita elektrického pole E** - je fyzikální veličina, vyjadřující velikost a směr elektrického pole. Je definována jako elektrická síla působící na těleso s kladným jednotkovým elektrickým nábojem.
- **Elektrické napětí U** - je určeno jako práce vykonaná elektrickými silami při přemísťování kladného jednotkového elektrického náboje mezi dvěma body prostoru. Elektrické napětí lze také vyjádřit jako rozdíl elektrických potenciálů v obou bodech prostoru.
- **Elektrická kapacita C** - popisuje schopnost soustavy vodičů uchovat elektrický náboj.
- **Elektrická polarizace P** - popisuje vektorově dodatečné elektrické pole vzniklé v dielektriku jeho polarizací.
- **Elektrická indukce D** - popisuje vektorově elektrické pole v libovolném prostředí jako výsledek působení pouze volných nábojů.

2.2 Elementární náboj

Elementární náboj je nejmenší možný elektrický náboj jedné samostatné částice. Velikost tohoto elementárního náboje je rovna elektrickému náboji elektronu. Elektron má záporný elementární náboj, proton má kladný elementární náboj.

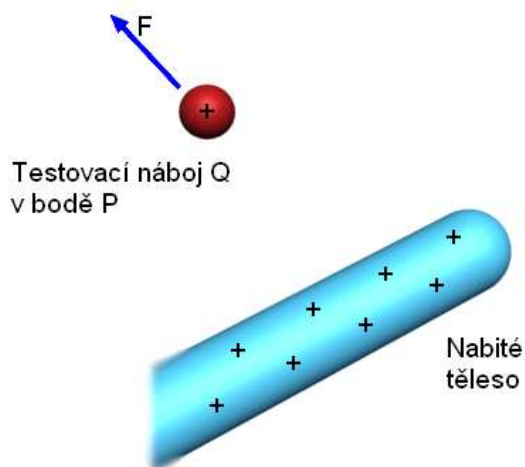
Velikost elementárního náboje: $e = 1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- Elementární náboj je nejmenší, dále nedělitelný elektrický náboj. Někdy se také hovoří o kvantování elektrického náboje, popř. o zákonu kvantování elektrického náboje.
- Elektrický náboj každého tělesa je celočíselným násobkem elementárního náboje.
- U běžných zeлектроvaných těles se toto kvantování elektrického náboje neprojevuje kvůli velkému množství částic a tedy značné „jemnosti“ celkového náboje. To nás opravňuje přiřazovat celkovému náboji makroskopického tělesa hodnoty, které nemusí být celočíselným násobky elementárního náboje. [12]

2.3 Elektrické pole

Elektrické pole je fyzikální pole, jehož zdrojem je těleso s elektrickým nábojem (*elektricky nabitě těleso*) nebo časově proměnné magnetické pole. Elektrické pole je pole, ve kterém se projevuje působení elektrické síly. Elektrické pole je částí elektromagnetického pole. [6]

Elektrické pole lze popsat vektorovou veličinou intenzita elektrického pole, která je definována vztahem $E = \frac{F}{Q}$, kde Q je testovací náboj. Elektrostatická síla působící na testovací náboj má stejný směr jako elektrická intenzita.

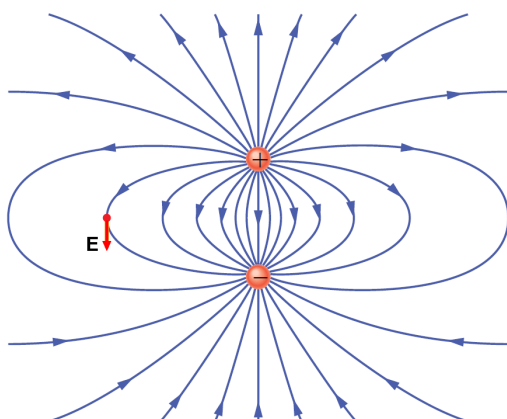


Obrázek 2.1 Kladný testovací náboj Q v blízkosti nabitého tělesa

2.3.1 Elektrické siločáry

Michael Faraday, který v 19. století zavedl pojem elektrického pole, si představoval prostor kolem nabitého tělesa vyplněný siločárami. Tyto elektrické siločáry jsou myšlené orientované křivky, které znázorňují elektrické pole. Vztah mezi siločarou a vektorem elektrické intenzity je následující:

- Kvalitativně: v každém bodě určuje směr tečny k siločáře směr vektoru E
- Kvantitativně: chceme-li vyjádřit nejen směr, ale i velikost elektrické intenzity, nakreslíme tolik siločar, aby jejich počet na jednotku plochy kolmé k siločarám byl úměrný velikosti E . V tom případě tam, kde jsou siločáry blízko u sebe, je pole silné (velikost intenzity E je velká) a tam, kde jsou daleko od sebe, je pole slabé. [1]



Obrázek 2.2 siločáry pole dvou nábojů opačných znamének

2.4 Elektrostatické jevy

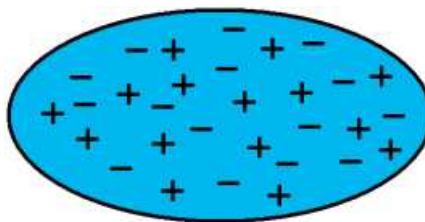
2.4.1 Přitahování a odpuzování nabitých těles

Již od starověku, přesněji od 6. století př. n. l., kdy řecký filozof Thales pozoroval přitažlivé síly, vznikající jako následek tření jantaru, jsou popsány projevy přitažlivých a odpuzivých sil mezi zelektrizovanými tělesy. Řecké slovo pro jantar je ἤλεκτρον (elektron), toto slovo se posléze stalo zdrojem pro novější slovo "elektřina". V současném pojetí označujeme jako zdroje těchto sil elektrické náboje, které třením na površích některých materiálů vznikají. Platí přitom, že existují dva druhy elektrického náboje (kladný a záporný), přičemž dva náboje stejného druhu se odpuzují, dva náboje opačného druhu naopak přitahují. Dva druhy „elektřiny“ poprvé rozlišil Charles Francois Dufay. První měření elektrického silového působení prováděl William Gilbert, který ho první odlišil od působení magnetického a který také zavedl pojem elektřina. Zákonitosti silového působení nezávisle na sobě kvantitativně popsali Henry Cavendish a Charles August Coulomb, podle kterého je nazván Coulombův zákon.

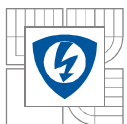
Třebaže elektrostatické síly se zdají být dost slabé, elektrostatická síla působící mezi elektronem a protonem v jádře vodíkového atomu je asi o 40 řádů silnější než jejich vzájemné gravitační přitahování. Elektrostatické silové působení je možné demonstrovat na příkladech, jako je přilnavost silonového sáčku k ruce, při česání suchých vlasů hřebenem přitažlivost vlasů a hřebenu nebo hromadění polétavého prachu na televizní obrazovce. Na principu elektrického odpuzování souhlasných nábojů je založen elektroskop. Elektrostatické přitažlivé síly jsou využívány v xerografii (v kancelářských kopírkách a tiskárnách) nebo v elektrostatických odlučovačích (filtrech) např. u průmyslových kouřovodů. [6]

2.4.2 Elektrostatická indukce

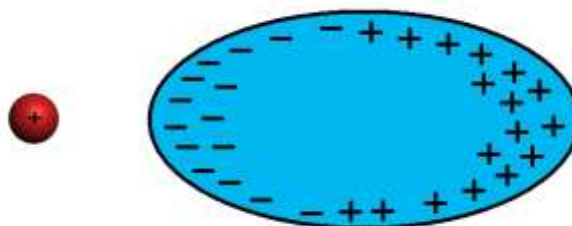
Vložením vodiče (tj. látky, ve které se elektrický náboj, přesněji nabitá částice, může volně přesouvat) do elektrického pole jiného nabitého tělesa se toto pole změní. Příčinou je přeskupení volných nabitých částic ve vodiči, nazývané elektrostatická indukce. Bez vlivu vnějšího pole jsou v *nenabitém* vodiči nosiče kladného i záporného náboje rovnoměrně rozloženy. Vlivem odpuzivých sil se nosiče náboje souhlasného s nábojem nabitého tělesa přesunou na protilehlou část vodiče, naopak nosiče náboje opačného se přitáhnou do přilehlé části vodiče. Vznik dvou seskupení opačných nábojů indukci lze prokázat oddělením přilehlé a protilehlé části vodiče a po odstranění vnějšího pole změřením indukovaného náboje na každé části elektroskopem. Ze stejného důvodu se v elektricky *nabitém* vodiči všechny nosiče „přebývajících“ náboje rozprostřou vzájemným odpuzováním na jeho povrchu, tj. co nejdále od sebe. [6]



Obrázek 2.3 rovnoměrně rozložené kladné a záporné náboje



Na principu elektrostatické indukce je založen kondenzátor, poprvé zkonstruovaný E. Kleistem a P. Musschenbroekem.



Obrázek 2.4 rozložení el. náboje pod vlivem vnějšího náboje

2.4.3 Polarizace dielektrika

V izolantu nejsou nosiče elektrického náboje volné; vložením do elektrického pole jiného nabitého tělesa proto nedojde k jejich přeskupení na povrch. Nosiče elektrického náboje obou polarit jsou vázány v atomech, molekulách či krystalových buňkách izolantu. Jejich polohy se však mohou mikroskopicky posunout a původně neutrální atomy tak změnit na dipóly, nebo polární molekuly či polární krystalové buňky uspořádat - v obou případech budou dipóly většinou orientovány souhlasným nábojem od vnějšího nabitého tělesa a budou tak zeslabovat výsledné pole v izolantu. Tento jev se nazývá polarizací dielektrika. Polarizaci dielektrika objevil Johann Carl Wilcke.

Polarizace dielektrika nemusí být vyvolána pouze elektrickým působením nabitého tělesa, ale může k ní dojít spontánně vzájemným spolupůsobením a jím vyvolaným samovolným uspořádáním polárních molekul nebo polárních krystalových buněk (tzv. ferroelektrický jev). [6]

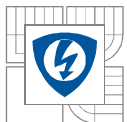
2.4.4 Elektrizace těles – statická elektřina

Pod elektrostatické jevy v širším slova smyslu se někdy zahrnují též jevy oddělení kladného od záporného náboje, hromadění náboje stejné polarit a přenosu elektrického náboje mezi tělesy (elektrizace) a projevy tzv. statické elektřiny, způsobené nashromážděním nábojů na povrchu různých těles a předmětů a jejich výměně při kontaktu s jinými povrchy. Alespoň jedno z těles je přitom nevodivé, tj. jeho povrch má vysoký elektrický odpor, což umožňuje shromáždění a setrvání nosičů náboje (u vodiče by se nosiče souhlasného náboje vzájemným odpuzováním rozptýlily). K zamezení negativních projevů statické elektřiny je proto potřeba zamezit vzniku nábojů (např. antistatické nástriky povrchů) nebo zajistit stálý odvod náboje vodivým spojením, např. uzemněním. [6]

Elektrický náboj „vzniká“ (resp. k oddělení nosičů kladného a záporného náboje dochází)

- kontaktem těles rozdílného materiálu
- elektrostatickou indukcí
- pyroelektrickým jevem (teplo)
- piezoelektrickým jevem (tlak)
- vnitřním fotoelektrickým jevem (zářením)

Náboj se předá z jednoho tělesa na druhé:



- dotykem
- sršením (zejména u hrotů těles) či výbojem
- vedením (elektrickým proudem)

Na principech elektrizace třením, sršení náboje a rozdělení nábojů po povrchu vodiče pracuje Van de Graafův generátor. Jako příklady negativních následků neutralizace nábojů statické elektřiny výbojem lze uvést spontánní explozi obilních sil či poškození elektronických součástek během jejich výroby. Vedle fyzických antistatických opatření, jako je chemické ošetření povrchů a uzemnění, lze uvést i „administrativní“ opatření proti negativním následkům – např. známý zákaz používání kanystrů z některých plastů pro vznětlivé látky (benzin). [6]

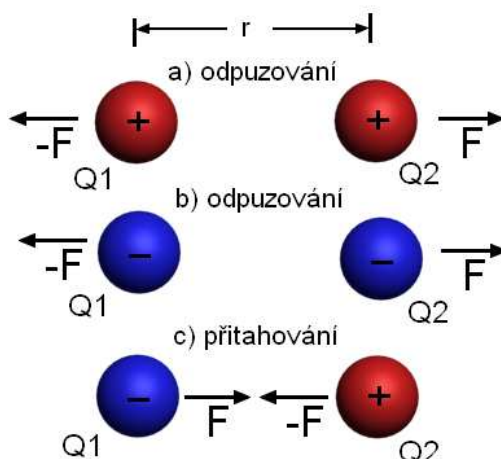
2.5 Coulombův zákon

Základním zákonem elektrostatiky je *Coulombův zákon*. Podle něj je elektrická síla působící mezi dvěma bodovými náboji přímo úměrná součinu jejich nábojů a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti. $F = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$, kde k je konstanta. Coulombův zákon má stejný tvar jako Newtonův gravitační zákon $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$, kde G je gravitační konstanta. Konstantu k bychom mohli v analogii s gravitační konstantou G nazvat „elektrostatická konstanta“. Obě rovnice vyjadřují zákon „převrácených čtverců“, v němž síla klesá se čtvercem vzdálenosti mezi interagujícími částicemi. Oba zákony se liší tím, že gravitační síly jsou vždy přitažlivé, zatímco elektrostatické síly mohou být jak přitažlivé, tak odpudivé podle toho, jaká jsou znaménka obou nábojů.

Coulombův zákon byl doposud potvrzen všemi pokusy, a to s vynikající přesností. Platí dokonce i uvnitř atomu. Popisuje správně sílu mezi kladně nabitým jádrem a každým ze záporně nabitých elektronů, ačkoli klasická Newtonova mechanika v této oblasti selhává a musí být nahrazena kvantovou fyzikou. Tento jednoduchý zákon také správně popisuje síly, kterými se navzájem vážou atomy při vytváření molekul, a rovněž síly, kterými jsou vzájemně vázány atomy a molekuly v pevných látkách a kapalinách. [1]

Coulombův zákon zapisujeme v SI ve tvaru:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$



Obrázek 2.5 vzájemné působení nabitých částic

Navíc platí tzv. *princip superpozice*, podle kterého vzájemné elektrické působení dvou nábojů není ovlivněno elektrickým působením dalších nábojů, tedy že elektrické síly lze vektorově sčítat. Spojenou formulaci Coulombova zákona a principu superpozice lze zapsat vztahem pro sílu, kterou působí bodové náboje Q_1, Q_2, \dots v místech daných polohovými vektory r_1, r_2, \dots na bodový náboj Q v místě daném polohovým vektorem r .

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} Q \sum_i \frac{Q_i(r - r_i)}{|r - r_i|^3}$$

ϵ_0 je univerzální konstanta, tzv. permitivita vakua.

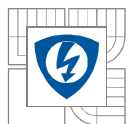
2.6 Gaussova věta

Z Coulombova zákona a principu superpozice lze odvodit ekvivalentní *Gaussovou větu*, podle které: Tok vektoru intenzity elektrického pole uzavřenou plochou je roven celkovému náboji plochou uzavřenému, dělenému permitivitou vakua: [2]

$$\oint_S E \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i Q_i$$

Gaussovou větu lze přepsat do tvaru pro elektrickou indukci a pouze volné náboje: Tok vektoru elektrického indukce uzavřenou plochou je roven celkovému volnému náboji (tj. bez vázaných polarizačních nábojů v dielektriku) plochou uzavřenému: [6]

$$\oint_S D \cdot dS = \sum_i Q_i^{(vol)}$$



3 ELEKTROMAGNETISMUS

Magnetické pole je fyzikální pole, jehož zdrojem je pohybující se elektrický náboj (tedy elektrický proud). Magnetické pole lze tedy pozorovat kolem elektrických vodičů, kde je zdrojem volný elektrický proud, ale také kolem tzv. permanentních magnetů, kde jsou zdrojem pole vázané elektrické proudy. Magnetické pole může být také vyvoláno změnami elektrického pole. Magnetické pole je částí elektromagnetického pole. Vztah mezi magnetickým a elektrickým polem popisují Maxwellovy rovnice.

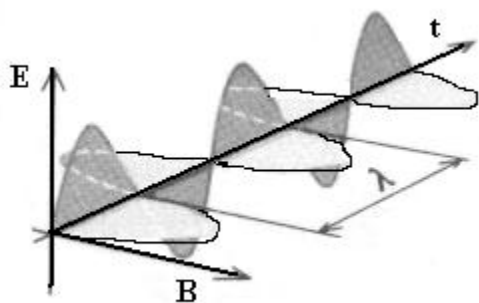
V přírodě lze nalézt určité látky, mezi kterými působí určité síly, které se označují jako magnetické síly. Tyto síly lze (na makroskopické úrovni) pozorovat i tehdy, když u nich nelze pozorovat žádný makroskopický pohyb elektrických nábojů. Takové látky se označují jako magnetické látky. O tělesech, které vykazují magnetické vlastnosti, říkáme, že jsou zmagetované, popř. je označujeme jako (permanentní) magnety. Tyto látky byly známy už ve starověku a bylo také známo působení (a existence) zemského magnetismu. Mnohé látky se mohou stát magnetickými vložení do magnetického pole - tento proces se označuje jako magnetizace. Později bylo zjištěno, že podobné síly se objevují také v okolí vodiče, kterým protéká elektrický proud. Především na základě experimentů Ampèrových a Oerstedových pak byl zaveden pojem magnetického pole. Další výzkumy ukázaly úzkou vazbu mezi pohybem elektrického náboje a existencí magnetického pole.

Dalším krokem k pochopení magnetismu byla kompletní teorie elektromagnetického pole, která sjednocuje jevy elektrické a magnetické. Formuloval ji James Clerk Maxwell a je shrnuta v soustavě tzv. Maxwellových rovnic doplněných materiálovými vztahy. Z této teorie pak Albert Einstein vycházel při formulaci speciální teorie relativity. Ta chápe magnetické pole jako projev elektrického pole pohybujících se nabitých částic. S užitím relativistické kvantové teorie lze přibližně v tomto smyslu vysvětlit i pole permanentních magnetů. [2]

3.1 Maxwellovy rovnice

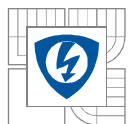
Maxwellovy rovnice jsou základní zákony v makroskopické teorii elektromagnetického pole, které zformuloval James Clerk Maxwell v roce 1865. Lze je zapsat buď v integrálním, nebo diferenciálním tvaru. V integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v jisté oblasti, kdežto v diferenciálním tvaru v určitém bodu této oblasti. [4]

Protože Maxwellovy rovnice byly postulovány a nemají žádný analytický závěr, mělo by se s nimi zacházet opatrně. Jak vidíme, jsou to parciální diferenciální rovnice. To znamená, že automaticky jsou v rozporu s axiomem jednoty prostoru, hmoty a času. Vysvětlíme si podstatu tohoto rozporu. Intenzita elektrického pole a intenzita magnetického pole se ve skutečnosti mění synchronně. Kromě toho, čas plyne synchronně se změnami intenzit obou polí. To znamená, že procesy změn intenzit elektrického a magnetického pole jsou funkcemi času. Je dokázáno, že intensity elektrického a magnetického pole se mění současně; proto souřadnice bodů v prostoru, kde se mění intenzita pole, by měly být funkcemi času. V Maxwellových rovnicích jsou r a t nezávislé proměnné. Tudíž popis změny šíření elektromagnetického pole pomocí Maxwellových rovnic neodpovídá procesům změny šíření těchto polí, které probíhají ve skutečnosti. Maxwellovy rovnice ignorují realitu a popisují změnu intensity elektrického pole a změnu intensity magnetického pole odděleně. Tento nedostatek je zhoršen nezávislostí souřadnic r na čase t . Takový popis je v rozporu s axiomem jednoty. Z toho vyplývá rozsah aplikací těchto rovnic. Mohou být použity v případech, kdy závislost souřadnic na čase nemrzáčí výsledek. Zjevně je to oblast elektrického inženýrství. Měli bychom poznamenat, že informace získaná takovým způsobem poskytne přibližný popis studovaného fenoménu a ten je někdy zkreslený. Například se to děje během popisu elektromagnetických emisí, což je jejich hlavní aplikační pole. Analyzujme tento proces podrobně. [4]



Obrázek 3.1 Vektory el. intenzity a mag. indukce jsou vůči sobě kolmé

Především se předpokládá, že intenzity elektrických složek E elektromagnetické vlny jsou kolmé na intenzity elektromagnetických složek B elektromagnetického pole. Ty se mění synchronně. Často je elektromagnetická vlna znázorňována jako dvě vzájemně kolmé sinusové vlny, které se šíří přímočaře. [3]



Označení	Význam	Jednotka SI
E	intenzita elektrického pole	V/m
H	intenzita magnetického pole	A/m
D	elektrická indukce	C/m ²
B	magnetická indukce	T
ρ	hustota volného náboje	C/m ³
j	hustota elektrického proudu	A/m ²

Tabulka 2 - Důležité veličiny elektromagnetismu

3.1.1 První Maxwellova rovnice – zákon celkového proudu

Integrální tvar:

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}, \Psi \equiv \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}, I = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}.$$

Cirkulace vektoru intenzity magnetického pole \mathbf{H} po libovolně orientované uzavřené křivce c je rovna součtu celkového vodivého proudu I a posuvného proudu $\frac{d\Psi}{dt}$. (Ψ je tok elektrického pole plochou S), spřažený křivkou c . Křivka c a libovolná plocha S , jež křivku obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě.

Diferenciální tvar:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}.$$

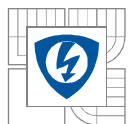
Rotace vektoru intenzity magnetického pole \mathbf{H} je rovna hustotě vodivého proudu \mathbf{j} a hustotě posuvného (Maxwellova) proudu $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$.

3.1.2 Druhá Maxwellova rovnice – Faradayův indukční zákon

Integrální tvar:

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}, \Phi \equiv \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}.$$

Cirkulace vektoru \mathbf{E} po libovolně orientované uzavřené křivce c je rovna záporně vzaté časové derivaci magnetického indukčního toku spřaženého křivkou c . Křivka c a libovolná plocha S , jíž křivka obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě.



Diferenciální tvar:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}.$$

Rotace vektoru intenzity elektrického pole \mathbf{E} je rovna záporně vzaté derivaci magnetické indukce \mathbf{B} .

3.1.3 Třetí Maxwellova rovnice – Gaussův zákon elektrostatiky

Integrální tvar:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q, \quad Q = \int_V \rho dV.$$

Elektrický indukční tok libovolnou vně orientovanou plochou S je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti V ohraničené plochou S .

Diferenciální tvar:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho.$$

Divergence vektoru elektrické indukce \mathbf{D} je rovna objemové hustotě volného náboje ρ . Ekvivalentní formulace: siločáry elektrické indukce začínají nebo končí tam, kde je přítomen elektrický náboj.

3.1.4 Čtvrtá Maxwellova rovnice – Zákon spojitosti indukčního toku

Integrální tvar:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0.$$

Magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou orientovanou plochou S je roven nule.

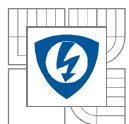
diferenciální tvar:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0.$$

Divergence vektoru magnetické indukce \mathbf{B} je rovna nule.

3.2 Magnetické pole

Magnetické pole je prostor, ve kterém působí magnetické síly. Magnetické pole je neoddělitelnou součástí elektromagnetického pole. Je-li elektrická část elektromagnetického pole potlačena, vzniká stacionární magnetické pole. Stacionární (časově neproměnné) magnetické pole vzniká rovnoměrným pohybem elektrického náboje. Rovnoměrný pohyb el. náboje může



probíhat např. ve vodiči (nejčastější případ – stejnosměrný proud) nebo volně v prostoru (paprsek elektronů nebo iontů v urychlovači nebo v obrazové trubici). [8]

3.2.1 Magnetické indukční čáry

Pro znázornění magnetického pole používáme obdobně jako pro elektrické pole *siločáry*. V případě magnetického pole je nazýváme *magnetické indukční čáry*. Magnetické indukční čáry tvoří na rozdíl od elektrických siločar vždy uzavřené křivky. Rovina magnetických indukčních křivek je kolmá ke směru proudu (pohybujícího se náboje). Magnetické čáry vždy směřují od severu N k jihu S – odvozeno z kompasu, protože Země je magnet a pól magnetu, který ukazoval k zeměpisnému severu, byl označen jako severní. Poblíž severního zeměpisného pólu leží jižní magnetický pól Země.

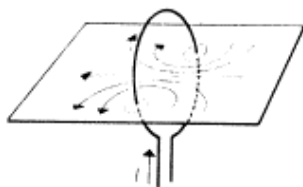
3.2.2 Magnetické pole přímého vodiče



Orientaci mag. indukčních čar pole přímého vodiče lze určit Ampérovým pravidlem pravé ruky:

Ukazuje-li při uchopení vodiče pravou rukou palec dohodnutý směr proudu, pak prsty ukazují orientaci mag. indukčních čar.

3.2.3 Pole proudového závitu a válcové cívky



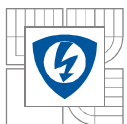
Mag. indukční čáry obklopují závit vodiče a jsou uzavřené. Válcovou cívku si můžeme představit poskládanou z jednotlivých proudových závitů. Mag. indukční čáry se protahují a uvnitř cívky jsou homogenní. V místě, kde siločáry vychází z cívky, je magnetický pól N (sever) a na druhém konci, kde siločáry do cívky vcházejí, je mag. pól S (jih). Pro určení orientace mag. indukčních čar závitu a cívky platí *Ampérovo pravidlo pravé ruky*.

Pravou ruku položíme na závit nebo cívku tak, aby pokrčené prsty ukazovaly dohodnutý směr proudu, palec pak ukazuje orientaci mag. indukčních čar. Obdobně to platí o jednotlivém závitu.

Podle typu (tvaru) siločar se fyzikální pole rozdělují na pole zřídlová a vírová. Pole zřídlové je pole, jehož siločáry vystupují ze zdroje nebo vstupují do zdroje. Zřídlovým polem je pole elektrické. Pole vírová jsou pole s uzavřenými siločarami. Vírovým polem je pole magnetické. Charakteristickým znakem vírových polí je, že nemají klasický zdroj (jako je třeba náboj – neexistuje magnetický náboj), ale vystupují jako doprovodná pole polí zřídlových. [8]

3.2.4 Magnetická indukce

V magnetickém poli působí magnetické síly. Magnetickými silami na sebe vzájemně působí jednotlivá magnetická pole vytvořená např. proudem ve vodiči a permanentním magnetem, nebo mezi cívkami, mezi permanentními magnety, mezi dvěma proudy ve vodičích. Magnetické pole popisujeme veličinou magnetická indukce \vec{B} . Je to vektorová veličina. [8]



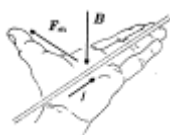
Základní situací, kterou použijeme k definování magnetické indukce, je stav, kdy vložíme vodič protékaný proudem do homogenního magnetického pole vytvořeného např. mezi póly permanentního magnetu. [8]

Na vodič protékaný proudem I působí v mag. poli síla F_m :

$$F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$$

l – aktivní délka vodiče (délka té části vodiče, která je v homogenním mag. poli), α – úhel sevřený vodičem a vektorem B

Směr síly F_m určíme *Flemingovým pravidlem levé ruky*:



Položíme-li levou ruku k vodiči tak, aby prsty ukazovaly směr proudu a indukční čáry vstupovaly do dlaně, ukazuje odtažený palec směr síly F_m působící na vodič.

Výše uvedený vztah pro magnetickou sílu platí jen pro přímý vodič s proudem. Můžeme jej však zobecnit pro tenký vodič libovolného tvaru, rozdělíme-li si tento vodič na velmi krátké přímé úseky dl . Výsledná magnetická síla působící na celý vodič je dána vektorovým součtem sil působících na jednotlivé úseky. [8]

magnetické indukce přímého vodiče:

$$B = \mu \cdot \frac{I}{2\pi \cdot d}$$

Velikost magnetické indukce je tedy přímo úměrná protékanému proudu a nepřímo úměrná vzdálenosti od vodiče.

Mag. indukce ve středu proudové smyčky (závitu):

$$B = \mu \cdot \frac{I}{2 \cdot r}$$

Uvnitř závitu je magnetické pole homogenní. I je proud procházející smyčkou, r je poloměr závitu.

mag. indukce cívky (solenoidu)

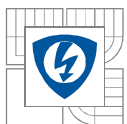
$$B = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

N je počet závitů cívky, I je proud procházející cívkou a l délka cívky. Uvnitř cívky je homogenní mag. pole.

3.2.5 Ampérův zákon

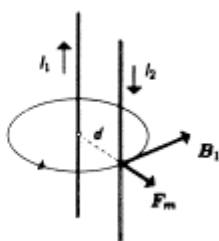
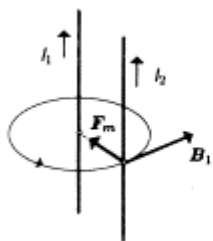
Je obdobou Newtonova zákona pro gravitační pole (závisí na hmotnosti) a Coulombova zákona pro el. pole (závisí na náboji). Vyjadřuje velikost síly mezi dvěma vodiči s proudem. Pro dva rovnoběžné vodiče s proudem ve vzdálenosti d a délce l odvodil *Ampère* pro magnetickou sílu tento vzorec. [8]

$$F_m = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 I_2}{d} \cdot l$$



Zda se budou oba proudy přitahovat nebo odpuzovat závisí na směru obou proudů. Je-li směr souběžný, vodiče se přitahují. Je-li směr protiběžný (každý proud má jiný směr) vodiče se odpuzují.

Pomocí Ampérova zákona se také definuje 1 A:



Ampér je stálý proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného průřezu umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 m od sebe vyvolá mezi vodiči sílu o velikosti $2 \cdot 10^{-7}$ N na 1 m délky vodiče.

3.3 Pohyb nabitě částice v homogenním magnetickém poli

Pohybuje-li se částice současně v elektrickém a magnetickém poli, působí na ni jak síla elektrická, tak síla magnetická. Výslednice obou těchto sil je **Lorentzova síla** \vec{F}_L . V nepřítomnosti elektrického pole je Lorentzova síla totožná s magnetickou silou \vec{F}_m .

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Z vlastností vektorového součinu dvou vektorů vyplývá, že síla je kolmá k vektoru rychlosti \vec{v} i k vektoru magnetické indukce \vec{B} . Protože Lorentzova síla působí kolmo ke směru pohybu, nekoná práci a kinetická energie (a tím i rychlost) částice zůstává konstantní.

Prozkoumejme pohyb kladně nabitě ($Q > 0$) bodové částice v homogenním magnetickém poli. Směr magnetického pole zvolíme jako osu z, tj. vektor magnetické indukce lze psát ve tvaru $\vec{B} (0,0,B)$. Směr osy x zvolíme tak, aby vektor rychlosti ležel v rovině xz. Vektor počáteční rychlosti pak bude $\vec{v}_0 = (v_0 \cdot \sin\vartheta, 0, v_0 \cdot \cos\vartheta)$. Protože směr síly ($\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$) je vždy kolmý k magnetické indukci, bude stále $F_z = 0$, složky rychlosti v_x, v_y se budou měnit. [13]

Určíme vektor síly:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = (Q \cdot v_y \cdot B, -Q \cdot v_x \cdot B, 0)$$

Z toho zrychlení

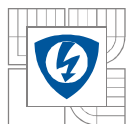
$$\vec{a} = \left(\frac{Q \cdot v_y \cdot B}{m}, \frac{Q \cdot v_x \cdot B}{m}, 0 \right)$$

A po přepsání do složek dostaneme:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{Q \cdot v_y \cdot B}{m} \quad (2); \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = -\frac{Q \cdot v_x \cdot B}{m} \quad (3); \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = 0 \quad (4)$$

Z rovnic ihned vidíme, že ve směru osy z, tj. ve směru magnetického pole, se částice pohybuje rovnoměrným pohybem, tedy stálou rychlostí $v_z = v_0 \cdot \cos\vartheta$. Zderivujeme-li podle času rovnici zrychlení v y ose a dosadíme do ní rovnici zrychlení v ose x, dostaneme:

$$\frac{d^2 v_y}{dt^2} = -\frac{Q \cdot B}{m} \cdot \frac{dv_x}{dt} = -\left(\frac{Q \cdot B}{m} \right)^2 \cdot v_y$$



Což po úpravě vede k diferenciální rovnici 2. řádu,

$$\frac{d^2 v_y}{dt^2} + \left(\frac{Q \cdot B}{m} \right)^2 \cdot v_y = 0$$

jejímž řešením je: $v_y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$. (5)

Kde $\omega = \frac{Q \cdot B}{m}$ (pro záporně nabitou částici by bylo $\omega = -\frac{Q \cdot B}{m}$) a A a φ jsou integrační konstanty. Ještě než je určíme z počátečních podmínek, dosadíme (5) do (3) a dostaneme

$$v_x = -A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$

Z počátečních podmínek vyplývá, že pro $\varphi = 0$, $A = -v_0 \cdot \sin \vartheta$. Pro vektor rychlosti v libovolném časovém okamžiku t pak máme:

$$v_x = v_0 \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \omega \cdot t$$

$$v_y = -v_0 \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$v_z = v_0 \cdot \cos \vartheta$$

Pro souřadnice x , y a z pak integrací (z rovnice $v_x = \frac{dx}{dt}$ vyplývá, že $x = \int v_x dt + C$) dostaneme:

$$x = \frac{v_0}{\omega} \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \omega \cdot t + C_x$$

$$y = \frac{v_0}{\omega} \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \omega \cdot t + C_y$$

$$z = v_0 \cdot \cos \vartheta \cdot t + C_z$$

Kde C_x , C_y , C_z jsou integrační konstanty, které opět vyjádříme z počátečních podmínek. Jestliže zvolíme počátek souřadné soustavy v bodě, kterým procházela nabitá částice v čase $t = 0$, dostaneme $C_x = 0$, $C_y = -\frac{v_0}{\omega} \cdot \sin \vartheta$, $C_z = 0$, tedy

$$x = r \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$y = r \cdot (\cos \omega \cdot t - 1)$$

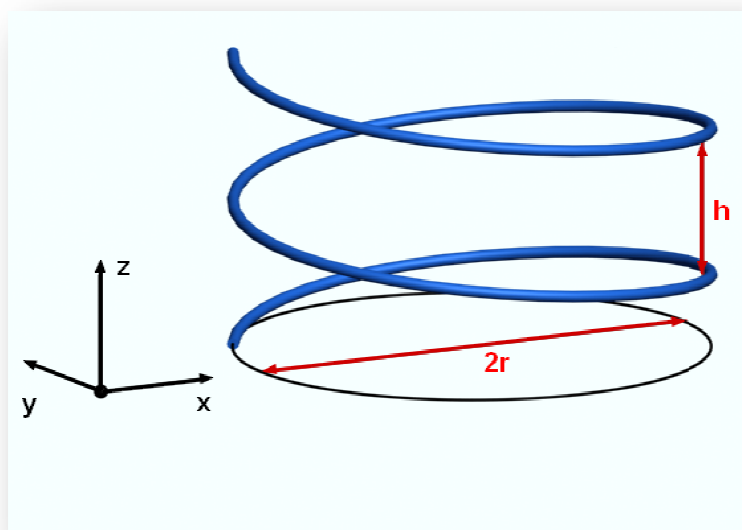
$$z = v_0 \cdot \cos \vartheta \cdot t$$

Kde $r = \frac{v_0}{\omega} \cdot \sin \vartheta$. Tyto rovnice popisují pohyb částice po šroubovici s konstantním poloměrem r a stoupáním h

Pro poloměr platí: $r = \frac{v_0}{\omega} \cdot \sin \vartheta = \frac{m \cdot v_0}{Q \cdot B} \cdot \sin \vartheta$.

Stoupání h dostaneme jako vzdálenost uraženou částicí ve směru osy z za dobu oběhu jedné smyčky šroubovice. Doba oběhu jedné smyčky je $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi \cdot m}{Q \cdot B}$ a proto

$$h = v_z \cdot T = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{Q \cdot B} \cdot v_0 \cdot \cos \vartheta$$



Obrázek 3.2 trajektorie nabité částice v homogenním magnetickém poli

Ještě rozebereme speciální případy:

- $\vec{v}_0 = (0, 0, v_0)$ - částice se pohybuje ve směru magnetického pole nebo $\vec{v}_0 = (0, 0, -v_0)$ - částice se pohybuje proti směru magnetického pole. V těchto případech je síla působící na částici nulová (vektorový součin je roven nule). Částice se pohybuje rovnoměrným pohybem v původním směru.
- $\vec{v}_0 = (v_0, 0, 0)$ - částice se pohybuje kolmo ke směru magnetického pole. V tomto případě se částice pohybuje rovnoměrným pohybem po kružnici o poloměru $r = \frac{m \cdot v_0}{Q \cdot B}$ v rovině xy. [13]

4 ELEKTRICKÝ PROUD V PLYNECH

Elektrický proud v plynech se za normálních podmínek nevyskytuje, ale může se objevit za zvláštních podmínek. Tyto podmínky musí v plynu způsobit vznik volných částic s elektrickým nábojem. Plyn se stává vodivým v silném elektrickém poli, při vysoké teplotě a nízkém tlaku. [9]

4.1.1 Elektrický výboj

Silné elektrické pole způsobí vytrhávání elektronů z atomů a molekul plynu (ionizaci plynu). Elektrický proud za této podmínky se nazývá elektrický výboj (též *jiskrový výboj* nebo *bleskový výboj*, *jiskra*, ap.) a je tvořen směsí volných elektronů a kladných, příp. záporných iontů v plynu. Elektrický výboj trvá většinou krátce - do doby vybití vnějšího elektrického pole - ale jeho velikost může být velmi vysoká, protože se jedná o krátkodobé uvolnění nahromaděné potenciální elektrické energie. [9]

Elektrický výboj pozorujeme při bouřce jako blesk, kolem elektrického vedení s vysokým napětím, při spínání nebo vypínání silnějších elektrických spotřebičů, při vzájemném tření umělohmotných kusů oblečení, ap. [9]

4.1.2 Elektrický oblouk

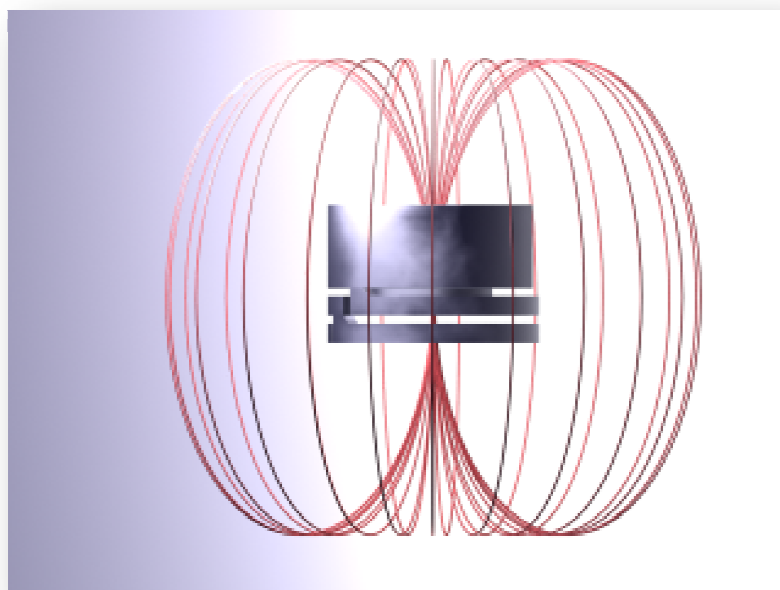
Vysoká teplota znamená velkou kinetickou energii částic plynu, při jejichž nárazech může docházet k vyrážení elektronů z atomů nebo molekul. Elektrický proud v plynu za vysoké teploty se nazývá **elektrický oblouk** a je tvořen směsí elektronů a iontů. Vyznačuje se velmi jasným světelným zářením, které se využívá v obloukových lampách. Vysoké teploty elektrického oblouku se rovněž využívá při obloukovém svařování nebo v elektrických tavících pecích. [9]

4.1.3 Elektrický výboj za nízkého tlaku

Snížením tlaku v plynu (vyčerpáním částic) dojde ke zvětšení střední volné dráhy částic plynu. Tím mohou částice dosáhnout větší rychlosti, a tedy kinetické energie dostatečné k ionizaci – vytrhávání elektronů z atomů a molekul plynu. Elektrický proud za této podmínky se nazývá **elektrický výboj za nízkého tlaku** (též *doutnavý výboj*) a je způsoben směsí elektronů a iontů. Tento elektrický výboj se vyvolává v trubicích s vyčerpáním vzduchem (výbojové trubice, katodové trubice), případně naplněné nějakým plynem. Různé druhy plynu a různé tlaky vyvolávají různé světelné jevy, které se využívají mj. v zářivkách a doutnavkách. [9]

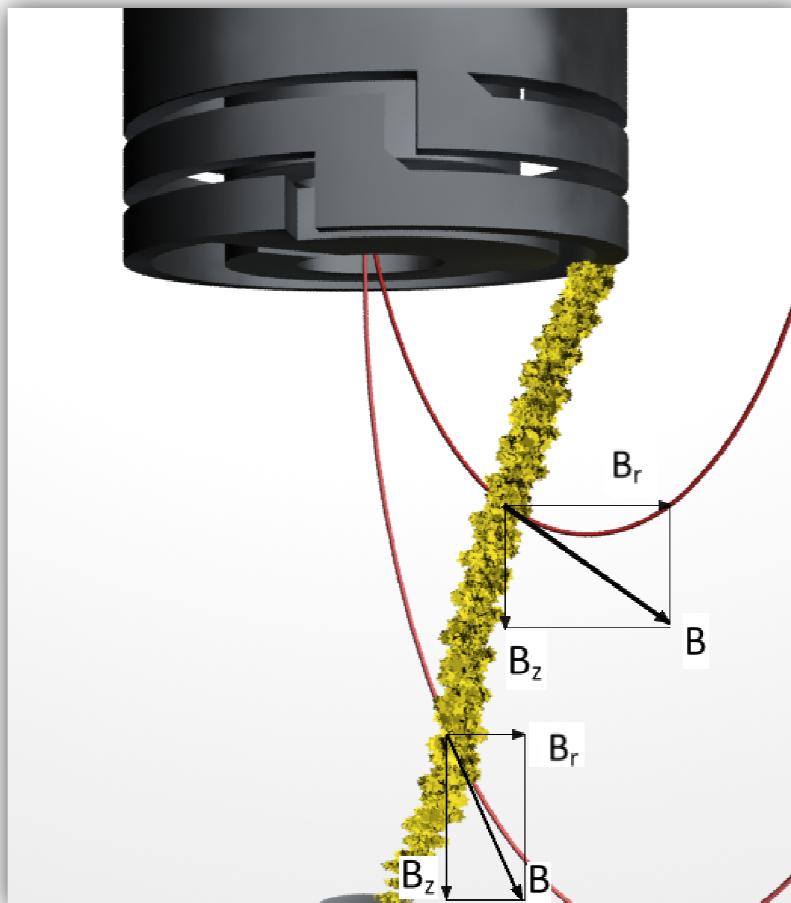
5 ROTAČNÍ CÍVKA VE ZHÁŠEDLE VYPÍNAČE VN

Jedním z prostředků zvyšující zhášecí schopnost spínačů je rotace spínacího oblouku. Rotaci spínacího oblouku lze docílit interakcí magnetického pole vlastního spínacího oblouku s jiným magnetickým polem, například s magnetickým polem cívky zařazené do obvodu po vzniku oblouku.



Obrázek 5.1 magnetické pole zhášecí cívky

Žádoucí pohyb paty spínacího oblouku po čelním závitu cívky předpokládá dominanci radiální složky magnetické indukce B_r v místě druhého závitu. Avšak B_r je větší než B_z až od jisté vzdálenosti od osy cívky. To znamená, že pokud spínací oblouk hoří v blízkosti osy zhášedla a není nucen jinými prostředky k přemístění paty na větší poloměr, setrvá spínací oblouk v blízkosti osy a jeho pata na vnitřním závitě 3, kde dominuje stabilizační účinek axiální složky B_z .

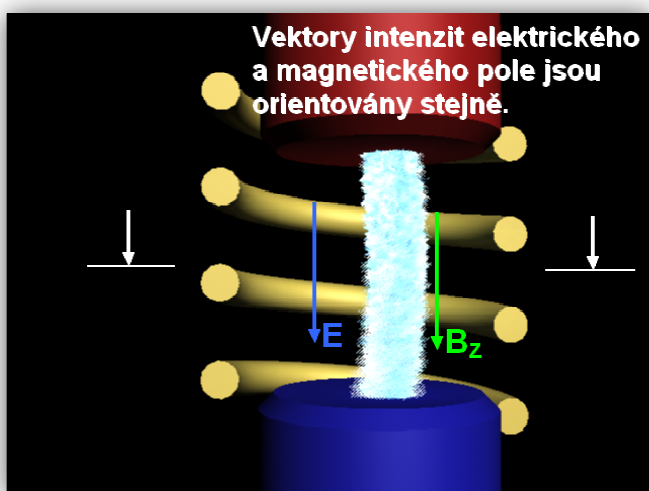


Obrázek 5.2 složky magnetické indukce

Po vysunutí pohyblivého kontaktu z pevného kontaktu cívky vznikne spínací oblouk. Jeho pata se přesune z pevného kontaktu na vnitřní závit cívky vlivem elektrodynamických sil. Oblouk začne rotovat vlivem radiální složky magnetické indukce vytvořené cívkou a odstředivá síla ho donutí přeskočit na vnější závit cívky. V této vzdálenosti od osy cívky se radiální složka magnetické indukce ještě zvětší a tím i síla působící na oblouk, která jej nutí rotovat.

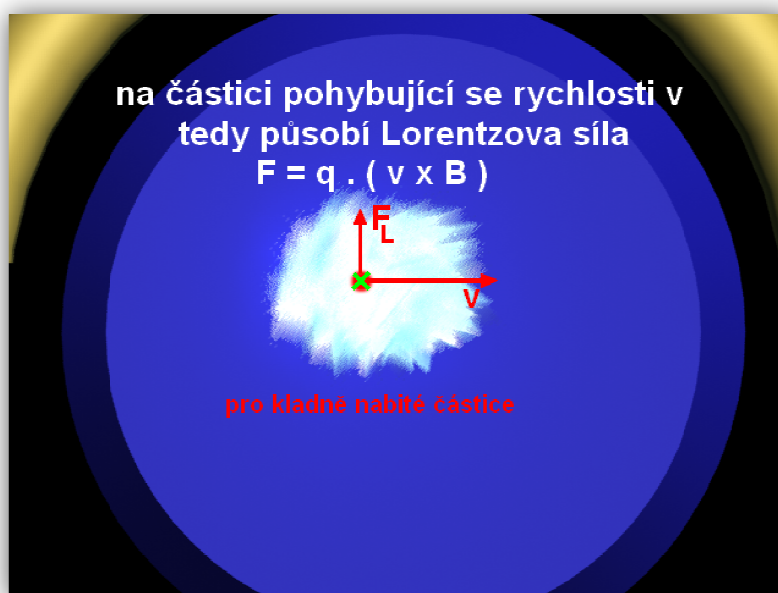
5.1 Účinky axiálního magnetického pole na oblouk

Nosiče náboje uvnitř spínacího oblouku konají pohyb podél magnetických siločar. Vektory intenzit elektrického a magnetického pole jsou tedy orientovány stejně. Proto magnetické pole nepůsobí na nabitě částice.



Obrázek 5.3- souhlasné vektory el. Intenzity a mag. indukce

Avšak kromě pohybu nabitých částic v důsledku působení elektrického pole existuje také pohyb v radiálním směru způsobený tzv. ambipolární difúzí. Vektor rychlosti těchto částic je orientován od vysoce zahřátého jádra oblouku k chladnějším vnějším vrstvám obloukového sloupce. Při tomto pohybu vektory rychlosti v a magnetické indukce B_z jsou navzájem kolmé a na částici s nábojem Q působí Lorentzova síla $\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$. Tato síla zakřivuje trajektorii difundujících částic a vnucuje jim pohyb po dráze s tzv. cyklotronním poloměrem. Přitom kladné ionty a elektrony víří v opačných směrech. Rychlost elektronů se prakticky neliší od rychlosti kladných iontů, ale jejich hmotnosti se liší podstatně $m_e \ll m_i$ a proto také impulzy $m_i \cdot v_i$ předávané od iontů neutrálním částicím jsou až tisícekrát větší, než impulzy $m_e \cdot v_e$ předávané od elektronů. Plasma oblouku se proto dostává do vířivého spirálovitého pohybu, který odpovídá pohybu iontů v magnetickém poli. Rychlost vířivého pohybu částic, vyvolaného podélným magnetickým polem se sčítá s axiální rychlostí částic, vyvolanou elektrickým polem. Výsledný spirálový pohyb částic způsobuje stabilizaci obloukového sloupce.



Obrázek 5.4- řez elektrickým obloukem

6 NANOSPIDER

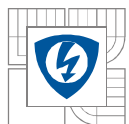
Nanospider je unikátní technologie, která umožňuje průmyslovou výrobu netkaných textilií tvořených nanovláknem, tj. vlákny o průměru 20 až 500 nm. Využití těchto materiálů je velmi široké. Dají se používat k filtraci, ve zdravotnictví, automobilovém průmyslu, energetice a dalších odvětvích jako je stavebnictví, automobilový průmysl, kosmetika, ochrana životního prostředí, ochranné pomůcky atd. Nanovláknem a jejich aplikace jsou odborníky na celém světě považovány za materiály třetího tisíciletí [10]



Obrázek 6.1- Vizualizace Nanospider zdroj: www.elmarco.com

6.1 Historie výroby nanovláken

První pokusy o výrobu nanovláken byly realizovány v letech 1934 až 1944 společností Formulas. V tu dobu publikovala řadu patentů popisujících experimentální instalaci pro výrobu polymerových vláken při použití elektrostatické síly. V roce 1952 uměli Vonnegua a Neubauer vyrobit proud vysoce elektrifikovaných uniformních kapiček o průměru 0,1mm a o tři roky později vyzkoumal Drozin rozptylování řady tekutin do aerosolů při vysokém elektrickém potenciálu. Další krok učinil v roce 1966 Simon, jenž patentoval přístroj na výrobu ultra tenkých a lehkých nanovláknenných tkanin s různými vzorky při použití elektrického zvlákňování. Zjistil, že vlákna z nízkoviskózních roztoků měla tendenci se zkracovat a zjemňovat zatímco vlákna z vysoceviskózních roztoků byla poměrně stále spojitá. V roce 1971 Baumgarten zhotovil přístroj k elektrosvlákňování akrylických vláken s průměrem v rozmezí 0,05 – 1,1 mikronů. Zvlákňovaná kapka se uvolňovala z kapilárové trubky z nerezové oceli a její stálá velikost byla udržována úpravou příváděcí rychlosti infuzní pumpy. Kapilárová trubka byla spojena se stejnosměrným proudem o vysokém napětí, zatímco vlákna byla zachycována na uzemněné kovové cloně. Na tyto badatele a především na jejich následníky ve firmách Reneker a Chun a Larronda a Manley navázal výzkumnou činnost tým profesora Oldřicha Jirsáka z Technické univerzity v Liberci. [10]



6.2 Princip technologie Nanospider

Technologie Nanospider je založena na revolučním objevu, že je možné vytvořit Taylorův kužel a následný proud hmoty nejen z vrcholu kapiláry, ale také z tenké vrstvy roztoku polymeru. Tento způsob byl nazván elektrospining. Vynalezl ho v roce 2003 profesor Oldřich Jirsák na katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci. Na rozdíl od předchozích pokusů výroby nanovláken, nepoužívá tato technologie žádných trysek ani kapilár pro tvorbu vláken. Jednou z možností realizace této technologie je válec částečně ponořený v roztoku polymeru. Válec se otáčí kolem své osy a přitom se na jeho povrchu vytváří tenký film roztoku polymeru. V horní úvratí rotačního pohybu válce, což je současně místo s nejnižší vzdáleností od kolektoru – protielektrody, se v důsledku maximální intenzity elektrického pole začnou vytvářet mnohačetná ohniska Taylorových kuželů, která následně vyústí v proces zvlákňování. Taylorovy kužele a následně proudy hmoty jsou vytvářeny v husté síti vláken pokrývajících horní část válce. Tím je dosaženo vysoké výrobní kapacity zvlákňování hlavy NanospideruTM. Proudů roztoku polymeru jsou poté zbaveny rozpouštědla a těsně před tím, než dosáhnou kolektoru, se stávají pevnými nanovlákný. [10]

6.3 Využití nanovláken

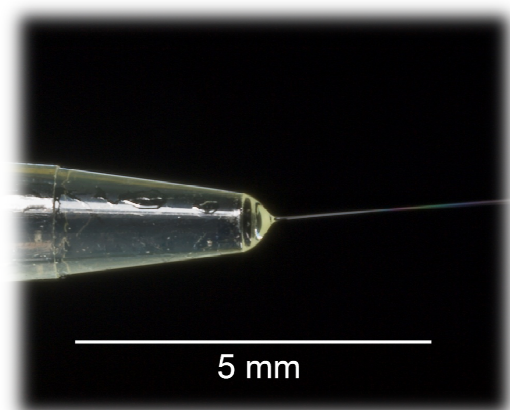
Průmyslová a laboratorní zařízení, která jsou založena na technologii Nanospider nabízí od roku 2005 jako jediná na světě liberecká firma Elmarco. Od roku 2006 vyrábí tato firma různé nanovláknenné materiály. Jedním z nich je NANOSPIDER AntimicrobeWebTM, jenž slouží k odstraňování fyzikálních nebo biologických nečistot z vdechovaného nebo vydechovaného vzduchu. Jeho vlastnosti jej předurčují k použití v medicíně, například jako účinné obličejové masky proti ptačí chřipce. AntimicrobeWeb byl testován v americké Nelson Laboratories v Salt Lake City, kde bylo zjištěno, že efektivita zachytu virů je větší než 99,9 %, stejné parametry má efektivita zachytu bakterií. [10]

NANOSPIDER AcousticWebTM je zvukoabsorbční materiál, který vznikl aplikovaným výzkumem a vývojem firmy a Technické univerzity v Liberci. Mimořádné vlastnosti získal tento materiál díky nanovláknům, která mají unikátní schopnost pohlcovat zvuk v široké řadě frekvencí. [10]

Společnost Elmarco byla v roce 2007 jediným producentem strojů na výrobu netkaných textilií z nanovláken na světě. V březnu 2007 prodala firma do USA první průmyslovou linku, která zhotoví přibližně 6 miliónů metrů čtverečných těchto textilií za rok. [10]

6.4 Elektrosinning

Elektrosinning, neboli elektrozvlákňování využívá elektrického náboje k vytváření velmi tenkého vlákna z tekutiny. Proces je neinvazivní a nevyžaduje použití srážecí chemie nebo vysokých teplot k produkci pevných vláken z roztoku. Tyto výhody z něj dělají obzvláště vhodné řešení pro produkci vláken používajících velké a komplexní molekuly. Elektrosinning z roztavených polotovarů je také využíván. Tato metoda zaručuje, že žádná rozpouštědla nemohou být přeneseny do finálního produktu.



Obrázek 6.2- Fotografie Taylorova kuželu

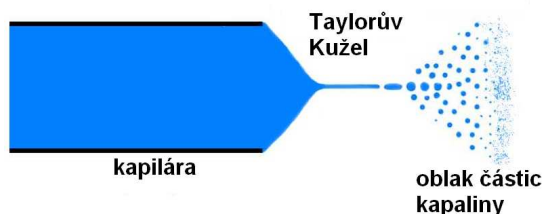
6.4.1 Výrobní proces

Při dostatečně vysokém napětí použitým na kapku tekutiny získá elektrický náboj. Elektrostatická odpudivost neutralizuje povrchové napětí a kapénka se natáhne. V kritickém bodě proud tekutiny propukne z povrchu. Tomuto bodu propuknutí se říká Taylorův kužel.



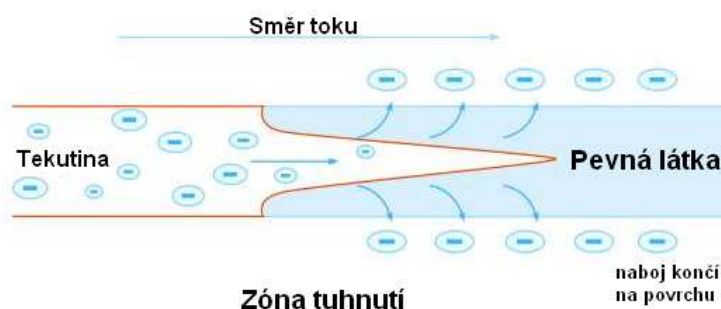
Obrázek 6.3- Princip elektrosinningu

Pokud je molekulární soudržnost kapaliny dostatečně vysoká, nedochází k rozkladu toku a vytváří se tenké vlákno nabité tekutinou. (Pokud se proud poruší, říká se tomuto jevu electrospray).



Obrázek 6.4- Electrospray

Vzhledem k tomu, že proud tekutiny schne během letu, mění se i tok z ohmického na konvektivní, jak náboj migruje na povrch vlákna. Proud vlákna je potom protáhlý mrskáním, způsobeným elektrostatickým odpuzováním vyvolaným v malých záhybech vlákna, dokud není nanesený na uzemněném kolektoru. Tažnost a ztenčování vlákna je výsledkem ohybové nestability, což vede k vytvoření jednotného vlákna s nanometrickým průměrem.



Obrázek 6.5- Proces tuhnutí vlákna

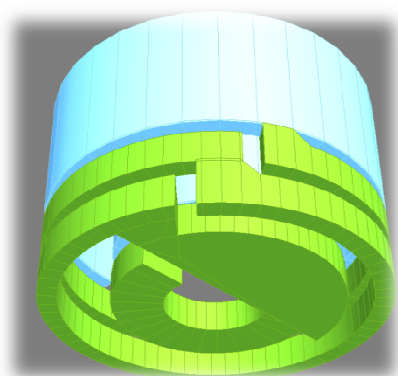
7 TVORBA ANIMOVANÉ PREZENTACE

Animace má mnoho využití. Lze použít jako pomůcka pro výuku, při školení, nebo prezentaci výrobků laické veřejnosti bez odborných znalostí. Animace je vytvořena v programu Autodesk 3ds Max 2009.

3ds Max (dříve 3D Studio Max) je balík nástrojů pro modelování, animaci a vizualizaci vyvíjený společností Autodesk Media and Entertainment. Je to jeden z nejpoužívanějších 3D animačních programů. Má velmi dobré schopnosti pro vytváření modelů, flexibilní architekturu snadno rozšiřitelnou o zásuvné moduly a dlouhou historii na Microsoft Windows platformě. Nejčastěji je využíván vývojáři počítačových her, pro tvorbu televizních reklam a architektonickými vizualizačními studií. Dále se také používá pro tvorbu speciálních efektů ve filmech.

7.1 Pracovní postup při tvorbě animace spínacího oblouku

V prvním kroku je potřeba vytvořit 3D model zhášecí cívky. Celý model se skládá ze základních tvarů Tube (trubice), Cylinder (válec) a Box (kvádr). Pomocí Booleovských operací Substraction (rozdíl) a Union (sjednocení) je postupně vymodelovaná celá cívka. Jednotlivá propojení závitů jsou vytvořena pomocí modifikátoru Edit Poly a následným vysunutím polygonů. Pomocí Material editoru je vytvořen materiál cívky.

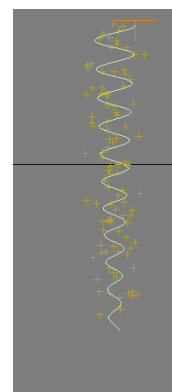


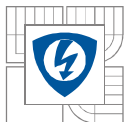
Obrázek 7.1 - 3D model cívky

Elektrický oblouk není tvořen z geometrického objektu. Pro jeho tvorbu byl využit částicový systém Snow (sníh). Jedná se o generátor částic, které chrlí do prostoru v závislosti na nastavených parametrech. Pohyb částic je usměrněn pomocí funkce Space Warp. Díky ní se částice pohybují po předem vytvořené trajektorii. V tomto případě se jedná o spirálu, čímž je dosaženo vířivého pohybu oblouku.

Tělo elektrického oblouku je vytvořeno z 10 000 částic. Tvorba animace je proto velmi náročná na výpočetní sílu procesoru. Pro lepší efekt by bylo vhodné použít ještě větší množství částic. Rendering by však trval neúnosně dlouhou dobu. Vytvoření 12s sekvence skládající se z 300 snímků trvalo na výkonném čtyřjádrovém procesoru téměř 10 hodin.

Samotný pohyb oblouku je realizován pomocí mnoha klíčových snímků, ve kterých se upravovala trajektorie letu částic a měnily se její parametry (délka, průměr a počet závitů).

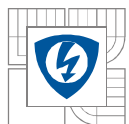




Obrázek 7.2 - vyrenderovaný snímek spínacího oblouku

Vyrenderované snímky animace byly ukládány do nekomprimovaného formátu s koncovkou .bmp. Video soubor z jednotlivých snímků byl vytvořen v programu VirtualDub. Jako komprimační kodek byl zvolen Windows Media Video 9, který nabízí uspokojivou kvalitu výstupu, při malé velikosti datového toku a tedy i velikosti video souboru. Navíc má tu výhodu, že jej nativně podporuje přehrávač Windows Media Player, obsažený v základní instalaci většiny operačních systémů MS Windows.

Výsledná animovaná prezentace je sestavená v programu Windows Movie Maker, ve kterém jsou dodělané popisné titulky, přechodové efekty mezi snímky a doplněny popisné snímky upravené v bitmapovém grafickém editoru PhotoFiltre. Obdobným způsobem je vytvořena i animovaná prezentace vzniku nanovláken pomocí technologie Nanospider.

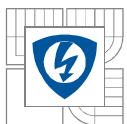


8 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s elektrostatickým a elektromagnetickým polem. Zejména jejich silovém působení na nabitě částice pohybující se v těchto polích. V první části práce jsou rozebrány základní pojmy elektrostatiky. Vysvětlen pojem elementární náboj, vznik elektrického pole a znázornění elektrického pole pomocí elektrických siločar. Vysvětleny jsou také elektrostatické jevy. Větší pozornost je věnována Coulombovu zákonu, jakožto hlavnímu zákonu elektrostatiky. V další části je obdobně rozebráno elektromagnetické pole. Zmíněny jsou Maxwellovy rovnice, které popisují vztah mezi elektrickým a magnetickým polem, příčina vzniku magnetického pole a jeho popis pomocí indukčních čar. Hlavní pozornost je opět věnována silovému působení na nabitě částice pohybující se v magnetickém poli. Vznik Lorentzovy síly a matematicky odvozená trajektorie pohybu nabitě částice po spirále. Jelikož se práce zabývá problematikou zhášení elektrického oblouku, je zde také stručně popsána příčina vzniku elektrického proudu v plynech.

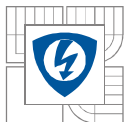
Dalším úkolem práce bylo vytvoření animované prezentace, která má za úkol popsat a vysvětlit účinky magnetického pole na spínací oblouk a pomoc při jeho zhášení. Tato prezentace se opírá o naměřené výsledky při experimentech se skutečnou cívkou prováděné doc. Ing. Bohuslavem Bušovem, CSc. Animace je vytvořena v programu Autodesk 3ds Max 2009 a doplněna o popisné obrázky vytvořené v grafickém editoru PhotoFiltre. Výsledná video sekvence je zkompleťovaná a doplněna o přechodové efekty ve video editoru Windows Movie Maker. Animace oblouku je vytvořena pomocí částicového systému. Tělo oblouku je tvořeno z 10 000 částic pohybujících se po určené spirálovité trajektorii. Rendering animace byl proto velice náročný na výpočetní sílu procesoru. Vypočet snímků trval téměř 20hodin na počítači osazeném výkonným čtyřjádrovým procesorem.

Posledním úkolem bylo vytvořit animovanou prezentaci principu vzniku nanovlákn pomocí unikátní technologie Nanospider. Detailní informace bohužel nejsou veřejnosti dostupné, protože jsou chráněna patentem. Animace tedy zobrazuje pouze princip funkce. Nikoliv přesný vzhled skutečného technologického zařízení. Obě animované prezentace se nacházejí na přiloženém DVD-R.



9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] David Halliday; Robert Resnick; Jearl Walker.
Vysokoškolská učebnice obecné fyziky
- [2] Kolektiv autorů, Wikipedia: *Magnetické pole*,
http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetické_pole
- [3] Ph.M. Kanarev: *Co popisují Maxwellovy rovnice?*
<http://free-energy.webpark.cz/kanarev/unity3.pdf>
- [4] Kolektiv autorů, Wikipedia: *Maxwellovy rovnice*
http://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy_rovnice
- [5] doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc:
Rotační cívka ve zhášedle modelu vypínače nn
- [6] Kolektiv autorů, Wikipedia: *Elektrostatika*
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrostatika>
- [7] Elmarco Nanospider™ Technology
<http://elmarco.com/nano/nanospider>
- [8] Doc. RNDr. Oldřich Lepil, CSc., PaedDr. Přemysl Šedivý:
Fyzika pro gymnázia – Elektřina a magnetismus (1995)
- [9] Kolektiv autorů, Wikipedia: *Elektrický proud v plynech*
http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrický_proud_v_plynech
- [10] Kolektiv autorů, Wikipedia: *Nanospider*
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanospider>
- [11] Kolektiv autorů, Wikipedia: *Electrospinning*
<http://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning>
- [12] Kolektiv autorů, Wikipedia: *Elementární náboj*
http://cs.wikipedia.org/wiki/Elementární_náboj
- [13] Miroslav Randa, Pedagogická fakulta ZČU Plzeň:
Pohyb nabitě částice v magnetickém poli
http://sf.zcu.cz/rocnik04/cislo01/cislo1.967/w_a5.html



PŘÍLOHY

[1] DVD-R